

DOI: <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i1.5360>GARCÍA ALVARADO, J. M. ET AL. (2018). Sellado de suelos a partir de teledetección y SIG...
Cuadernos Geográficos 57(1), 39-60

39

Sellado de suelos a partir de teledetección y SIG en el Programa de Actuación Urbanística (PAU) del sudeste de Madrid (España)¹

JOSÉ MARÍA GARCÍA ALVARADO² ✉ | PILAR GARCÍA RODRÍGUEZ³
M^a EUGENIA PÉREZ GONZÁLEZ⁴

Recibido 30/11/2016 | Aceptado 31/01/2018

Resumen

El objetivo de este trabajo es integrar distintas fuentes de información espacial (catastros, ortofotografías e imágenes de satélite), que requieren tratamientos dispares, para medir y evaluar el sellado de suelos en un proyecto urbanístico reciente en el sureste de la ciudad de Madrid, con el fin de establecer una metodología de seguimiento espacio-temporal de este parámetro. Otro objetivo es mostrar si el proceso de urbanización actual respeta las directrices medioambientales europeas en las que el suelo impermeabilizado o sellado, inherente al desarrollo económico, coexiste con espacios naturales que permitan mantener algunas funciones ecológicas como suavizar el microclima urbano, fijar los niveles de crecimiento de CO₂ en cifras estables acordes con la calidad y los estándares medioambientales europeos, amortiguar inundaciones y preservar la biodiversidad.

Los valores de sellado de suelos medidos a partir de diferentes fuentes y mediante técnicas complementarias arrojan resultados similares cuando la impermeabilización es superior al 60 %. No obstante, los cálculos obtenidos mediante las imágenes de satélite varían en función de su resolución espacial y del tipo de tratamiento aplicado. Con el satélite Spot los valores de sellado están próximos al 24%, mientras que con el Sentinel-2 el porcentaje asciende al 30 %. Las ortofotos ofrecen mayor precisión espacial, por lo que se han podido establecer niveles de sellado (< 20 %, 20-40 %, 40-60 % y > 60 %), pero su baja resolución temporal impide un seguimiento continuado, al menos anual. Por tanto es necesario utilizar distintas fuentes cartográficas al realizar un estudio de áreas urbanas, ya que las diferentes resoluciones temporales, espaciales y espectrales permiten visualizar distintas características en cada una de ellas. En consecuencia su complementariedad ayuda a corregir las posibles insuficiencias de cada una de ellas.

Palabras clave: sellado de suelos; ortofotografías; imágenes de satélite; usos del suelo; Madrid.

1. Investigación financiada por el proyecto CSO2012-34785, Ministerio de Economía y Competitividad, Gobierno de España.

2. Profesor Titular del Departamento de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid. josemaga@ucm.es

3. Profesor Titular del Departamento de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid. mpgarcia@ucm.es

4. Profesor Titular del Departamento de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid. meperez@ucm.es

Summary

Soil Sealing from Remote Sensing and GIS in the Urban Development Program (PAU) of Southeast of Madrid (Spain)

The aim of this paper is to integrate different sources of spatial information (cadastres, orthophotographies and satellite images), which also require different treatments, in order to be able to measure and evaluate the sealing of soils in a recent urban development project in the southeast of the city of Madrid, in order to establish a methodology of space-time monitoring of this parameter. Another objective is to show if the current urbanization process respects the European environmental guidelines in which waterproofed or sealed soil, inherent in economic development, coexists with natural spaces that allow to maintain some ecological functions such as softening the urban microclimate, setting growth levels of CO₂ in stable figures in line with European environmental quality and standards, damping floods and preserving biodiversity.

The sealing values of soils measured from different sources and using complementary techniques generate similar results when the waterproofing is higher than 60%. However, the calculations obtained from satellite images vary according to their spatial resolution and the type of treatment applied. With the Spot satellite the sealing values are close to 24%, while with the Sentinel-2 the percentage rises to 30%. Orthophotographies offer greater spatial precision, so sealing levels (<20%, 20-40%, 40-60% and > 60%) have been established, but their low temporal resolution prevents continuous monitoring, at least annually. Therefore, it is necessary to use different cartographic sources when carry out a study of urban areas, since the different temporal, spatial and spectral resolutions allow to visualize different characteristics in each of them. Consequently, their complementarity helps to correct the possible inadequacies of each of them.

Key words: sealing soil; orthophotographs; Satellite images; land use; Madrid.

Résumé

Imperméabilisation du sol avec télédétection et des S.I.G. dans le Programme D'urban Action (PAU), dans le sud de Madrid (Espagne)

L'objectif de cet article est d'intégrer différentes sources d'informations spatiales (cadastres, orthophotographies et images satellitaires) nécessitant différents traitements pour mesurer et évaluer l'imperméabilisation des sols dans un récent projet de développement urbain dans le sud-est de la ville de Madrid, afin d'établir une méthodologie de suivi spatio-temporelle de ce paramètre. Un autre objectif est de montrer si le processus d'urbanisation actuel respecte les directrices environnementales européennes dans lesquelles les sols imperméabilisés ou scellés, inhérent au développement économique, coexiste avec des espaces naturels qui permettent de maintenir certaines fonctions écologiques telles que imperméabilisés du microclimat urbain, la fixation de niveaux de croissance de CO₂ en chiffres stables en conformité avec la qualité et les normes environnementales européennes, amortissant les inondations et préservant la biodiversité.

Les valeurs d'étanchéité des sols mesurés à partir de différentes sources et utilisant des techniques complémentaires donnent des résultats similaires lorsque l'imperméabilisation est supérieure à 60%. Cependant, les calculs obtenus par les images satellitaires varient en fonction de leur résolution spatiale et du type de traitement appliqué. Avec le satellite Spot, les valeurs d'imperméabilisation des sols sont proches de 24%, tandis que le Sentinel-2 augmente à 30%. Les orthophoto-

graphes offrent une plus grande précision spatiale, de sorte que les niveaux d'imperméabilisation (<20%, 20-40%, 40-60% et > 60%) ont été établis, mais leur faible résolution temporelle empêche la surveillance continue, au moins une fois par an. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser différentes sources cartographiques pour réaliser une étude des zones urbaines, car les différentes résolutions temporelles, spatiales et spectrales permettent de visualiser différentes caractéristiques dans chacune d'entre elles. Par conséquent, leur complémentarité contribue à corriger les insuffisances possibles de chacune d'elles.

Mots-clés: impermeabilisation sols; orthophotos; images satellites; utilisation du sol; Madrid.

1. Introducción

La impermeabilización del suelo es una consecuencia inherente al desarrollo urbano, industrial y de los transportes, que supone uno de los problemas ambientales recientes más acusados en amplias regiones del planeta, y que afecta en España con especial intensidad a las grandes ciudades y áreas costeras. El sellado comenzó a ser investigado como un proceso más de erosión de suelos, si bien en un principio se centraban en los procesos de degradación por compactación, que en ámbitos áridos y semiáridos presentan graves dificultades de regeneración, aunque todavía podrían ser reversibles (Govers y Poesen, 1986; Poesen y Govers, 1986; Valentín, 1994; Heil *et al.* 1997; Römkens *et al.*, 1997; Singer y Yves, 1998; Al-Dousari, 2000). No obstante, el tema ha ido adquiriendo mayor interés en los últimos años (Blum *et al.* 2004; Castillo *et al.* 2004; Burghardt, 2006; Ojeda y Villa, 2006; García y Pérez, 2007; Montanarella, 2007; Romero *et al.* 2011; Scalenghe y Marsan, 2009; Valera *et al.*, 2011 a y b; Moreira, 2012; Ungaro *et al.* 2014; Caballero, 2017), aunque todavía queda por hacer efectivo este parámetro ambiental en los planes de desarrollo urbanos.

Una incompleta planificación urbana o el incumplimiento de las normas de ordenación del territorio ocasionan la desaparición de suelos muy fértiles de manera irreversible (Blum, 1998; Lavalley *et al.*, 2001, EEA, 2006; AEMA, 2012, entre otros). La propuesta española para la estrategia UE 2020 para un desarrollo sostenible establece como objetivo prioritario proteger y mejorar los suelos de la Unión Europea con especial énfasis en el sellado del suelo (<http://www.eeb.org/press/2009>) y tratar los procesos de degradación causados por prácticas insostenibles en su utilización. De ahí, la importancia de una acertada planificación urbana (Artmann, 2014), más factible en las nuevas áreas de expansión que en los centros urbanos con altas densidades de edificación y pocos suelos sin impermeabilizar. Se trata una vez más de aproximarse al deseable desarrollo sustentable,- lograr las mayores cotas de desarrollo sostenible, a pesar de tener éste una conceptualización cada vez más compleja y polisémica,- que facilite la integración de los elementos antrópicos, inherentes a una progresiva ganancia en indicadores de la calidad de vida, con los elementos naturales, imprescindibles para que ésta sea efectiva y mantenida a largo plazo.

Como continuación de los trabajos anteriores (García *et al.*, 2014; Pérez y García, 2017; García *et al.* 2018), vinculados al proyecto de investigación sobre el sellado de suelos, se presenta un estudio de caso que permita descender a escala grande el conocimiento sobre la validez de las distintas metodologías utilizadas.

Este trabajo profundiza en el seguimiento y medida del sellado de suelos con la finalidad de conocer el alcance de este proceso en un proyecto urbanístico reciente en la ciudad de Madrid (García y Pérez, 2016; Munafo *et al.*, 2010, 2013; Gardi *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2013; García *et al.*

2014; Pulido *et al.* 2014; Pérez y García, 2013), y analizar el grado de aplicación de las medidas de “buenas prácticas” establecidas por la Agencia Europea del Medioambiente (Prokop *et al.*, 2011; AEMA, 2012). Éstas recomiendan compatibilizar el desarrollo urbano –con la consiguiente pérdida de suelo– con algunos sectores sin sellar, que garanticen el mantenimiento de las funciones ecosistémicas vitales de los suelos (capacidad de infiltración del agua, soporte de la vegetación, de la fauna y microfauna, eliminación de contaminantes, mantenimiento del ciclo del carbono, regulación de los microclimas urbanos, entre otras).

Metodológicamente, el análisis del sellado de suelos se ha ido adaptando rápidamente a la información espacial disponible, que abarca las fotografías aéreas, ortofotografías, imágenes de satélite, planos del catastro, cartografía temática diversa, que permiten análisis espaciales a diferentes escalas, según la fuente utilizada. Así, las primeras clasificaciones elaboradas a partir del satélite Landsat (con una resolución espacial de 30 m), recogidas en el programa *Corine Land Cover*, ofrecen una escala de detalle 1:100.000, y han resultado de gran utilidad para estudios a escala regional o nacional, pero son poco apropiadas a la escala municipal o de distrito. Para estos casos se deberían utilizar bases espaciales de gran detalle (catastros o fotografías aéreas a gran escala), con el único inconveniente de la dependencia temporal en sus actualizaciones. Como complemento las imágenes de satélite de alta y media resolución espacial tienen la enorme ventaja de la constante actualización, y su empleo en estudios urbanos resulta de gran utilidad, una vez que su precio ha dejado de ser un obstáculo, pues se puede acceder a una amplísima variedad de imágenes sin coste alguno. La gran ventaja que supone el lanzamiento del satélite europeo Sentinel-2 en 2015 es que permite la continuidad con la serie Landsat, compatibilizando la información espectral y con una mejora notable en la resolución espacial, radiométrica y espectral.

La teledetección ha sido utilizada por numerosos autores para hacer estudios de sellado de suelos (Netzband y Meinel, 1998; Lavallo *et al.* 2001; Moeller, 2005; Kampouraki *et al.* 2006; Escudero *et al.*, 2010; Tomás *et al.* 2010; García y Pérez 2011, 2014; Harb 2012; Mukesh *et al.* 2015 y Pérez y García, 2016). El reciente lanzamiento del satélite europeo Sentinel, ofrece desde 2015 continuidad y gran precisión a la observación de la Tierra. Con el sensor multispectral 2 le dan versatilidad tanto para el seguimiento de numerosos fenómenos naturales, como para procesos antrópicos. Entre ellos, el notable crecimiento urbano, muy acusado en las grandes ciudades, puede analizarse a partir de las imágenes, con la enorme ventaja de poder actualizar la cartografía obtenida con gran rapidez.

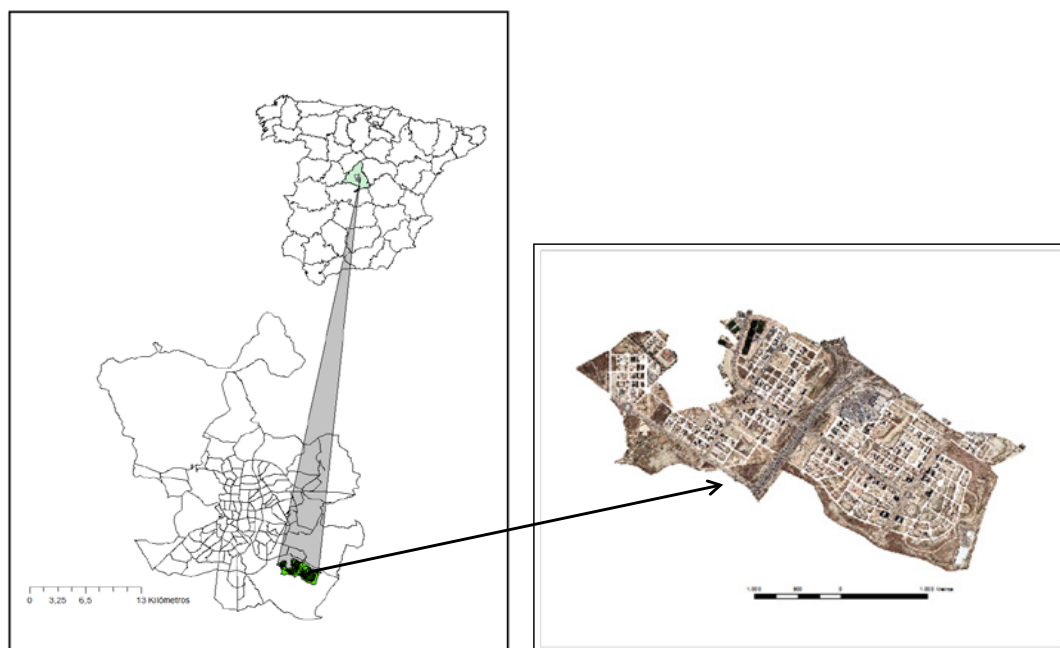
Este trabajo tiene como objetivo primordial verificar la validez de diferentes fuentes de información geográfica (catastros, ortofotografías e imágenes de satélite), que requieren también tratamientos dispares, para poder medir y evaluar el sellado de suelos a diferentes escalas y demarcaciones territoriales. Al incorporar distintas fuentes se podría realizar el seguimiento espacio-temporal de este proceso con una periodicidad anual, recurrencia que no puede alcanzarse con el uso de la información catastral y fotografías aéreas.

Otro objetivo del trabajo es analizar si el modelo de urbanización actual respeta las directrices medioambientales europeas (AEMA, 2012) en las que el suelo impermeabilizado, inherente al desarrollo económico, coexiste con espacios naturales que permitan mantener algunas funciones ecológicas (Hartemink, 2006), como reducir incrementos de la temperatura, elevar la evapotranspiración, amortiguar los efectos de las inundaciones, mantener los sumideros de CO₂ y no incrementar la pérdida de biodiversidad.

2. Área de Estudio

El área de estudio se ubica en la periferia sureste del municipio de Madrid (Mapa 1), con una altitud de 644 m.s.n.m. y una topografía acolinada, con valles de arroyos temporales, que forman parte del curso bajo del río Manzanares, afluente del Tajo por su margen derecha.

Mapa 1. Localización área de estudio



Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (2014) y Elaboración propia

El espacio ocupado por el PAU (Programa de Actuación Urbanística) pertenece a una zona de transición entre los depósitos salinos de la cubeta sedimentaria del Tajo y los materiales detríticos de borde de cuenca, característicos de la región occidental de Madrid. Forma parte de la facies intermedia de la Depresión del Tajo, constituida por materiales miocenos con facies de arcosas provenientes de la alteración de los granitos del Sistema central, que pasan a yeso y lutitas del centro de la depresión del Tajo.

En toda el área dominan las arenas y arcillas con intercalaciones de yesos y presencia de sepiolita y piedras de sílex. Además existen depósitos cuaternarios ligados a los cauces fluviales y pequeños glaciares existentes, ya que el área estaba drenada, antes de su canalización, por el arroyo de la Gavia (NW-SE), con depósitos de gravas, arenas, limos y arcillas. Los depósitos de glaciares tienen una pequeña extensión y están formados por arenas y sepiolita con algunos cantos de caliza y sílex.

En concreto la expansión urbanística, localizada al sudeste de Madrid, se ha edificado sobre materiales del mioceno compuestos por arcillas con intercalaciones de margas, carbonatos y sílex (IGME, 1989). Solo en los puntos más elevados aparecen arenas cuarzo-feldespáticas, gravas y cantos. Esto contrasta con el resto del municipio de Madrid en el que dominan las arenas arcósicas.

A estas características geomorfológicas habría que añadir la existencia de importantes depósitos de residuos urbanos, a veces formando colinas de extensión considerable, formadas por vertederos y escombreras. En algunos lugares se sellaron y fueron ajardinados.

Según la clasificación WBRS (2014) la mayoría de los suelos corresponden al grupo de los Luvisoles háplicos y con menor extensión Calcisoles y Leptosoles eútricos. Antes de la urbanización del Ensanche de Vallecas, en la vega del arroyo de la Gavia había Fluvisoles calcáricos, que fueron eliminados por la construcción del colector de la Gavia y de la autovía M31. Sobre las margas yesíferas se han desarrollado Regosoles calcáricos. Respecto a las clases agrológicas corresponden a las categorías B y C (Monturiol y Alcalá, 1990 a y b). Sus factores limitantes para el uso agrícola son el poco espesor y el bajo contenido en materia orgánica. Su productividad es media baja, pese a lo cual ha existido explotación agraria hasta tiempos recientes y aún se mantiene, en las zonas no urbanizadas, la presencia del paisaje agrario.

Este área se encuadra en la campiña madrileña, que está dominada por los cultivos de cereales de secano. Hay algunas comunidades de vegetación natural instaladas en pequeños terrenos marginales. Destacan algunos pastizales y especies halófitas y/o gipsícolas: *Salsola vermiculata*, *Salsola kali*, *Artemisia herba-alba* y *Gypsophila struthium*. La principal asociación fitosociológica que inicia el proceso de regeneración de la vegetación tras el abandono de la actividad agraria es *Genistoscorpii-Retametlmsphaerocarpaceae*. En condiciones favorables se presenta como una comunidad arbustiva poco densa en la que, acompañando a la retama (*Retama sphaerocarpa*), aparecen tomillos (*Tymus vulgaris*) y aliagas (*Helianthemum* sp.).

El sellado de los suelos por efecto de la urbanización no repercute mucho en la pérdida de suelos fértiles, pero sí puede afectar a los movimientos de agua y a la pérdida de biodiversidad de especies gipsícolas, ya que el entorno del Ensanche de Vallecas es un sector caracterizado por unos sedimentos ricos en yesos y sepiolitas que mantienen algunas especies vegetales características de estos ambientes semiáridos.

Los problemas que el sellado provoca en los ciclos hidrológicos y en el incremento de la escorrentía han sido estudiados por numerosos autores (Mualem *et al.*, 1990; Assouline y Mualem, 2006; Chen *et al.* 2013; Jakab *et al.* 2013 Ungaro *et al.* 2014), así como en la erosión del suelo (Römkens *et al.* 1997, Singer *et al.*, 1998; Ramos *et al.*, 2000; Romero *et al.* 2011).

El PAU (Programa de Actuación Urbanística) estudiado es un amplio espacio desarrollado hacia el este y sureste del núcleo de Vallecas Villa, y su extensión de la segunda mitad del siglo XX, sobre todo desde los años sesenta. La Autopista A-3, cierra por el norte-noreste el espacio urbano, y la M-45 secciona en dos desiguales partes el PAU, el resto de los bordes se delimitan por un entorno de morfología y paisaje suburbano acolinado – rural, en algunos casos barbechos roturados, y en su mayor parte eriales. Este paisaje es el que ocupa el espacio libre de urbanización, que bordea el área del PAU y se extiende hasta la M-50, y la “Cañada Real”, caso especial de urbanización marginal sobre una vía pecuaria.

En el área de estudio, sobre las facies litológicas, las formaciones edáficas y las comunidades vegetales antes descritas, imponiéndose a una morfología rural subyacente, más residual que activa, vienen desarrollándose promociones de contenido predominantemente residencial, con otros usos derivados y complementarios a esta función de residencia urbana, la mayoría de los cuales no tienen un alcance más allá del propio proyecto urbanístico. El uso industrial, es testimonial, pues se centra en el Polígono Industrial de Vallecas. Casi podría decirse que hay un “monocultivo” residencial-terciario, en la línea de la especialización funcional del crecimiento urbano, negativa, a decir de algunos de cara a la sostenibilidad y vida urbana (López de Lucio, 2007).

3. Material y Métodos

Este trabajo integra las diferentes técnicas de interpretación, tratamiento y representación espacial, de carácter vectorial y raster, con las fuentes cartográficas, fotográficas (Eilers, 1973) e imágenes de satélite disponibles.

La fuente para los trabajos de evaluación visual del sellado de suelo en el PAU Ensache de Vallecas, y su posterior traslado a cartografía SIG, ha sido, como en desarrollos urbanos estudiados anteriormente (García *et al.* 2018), el recorte del mosaico de ortofotos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del espacio normativo del citado PAU, con la delimitación parcelaria del mismo que ofrece el plano parcelario del servidor Cartociudad (Instituto Geográfico Nacional).

Se han revisado diversas bases de datos y se han seleccionado las imágenes de satélite más adecuadas para la evaluación y seguimiento del sellado de suelos en el SE de Madrid, que fuesen gratuitas vía web o mediante convenios con determinadas entidades públicas (Instituto Geográfico Nacional y Agencia Espacial Europea). Aquí se han utilizado imágenes de los satélites Landsat 8, Spot 5 y Sentinel 2, con características multispectrales y pancromáticas. Este último satélite, en órbita desde 2015, supone la mejor apuesta europea en la observación de la Tierra y la continuidad de las aplicaciones terrestres, pues dispone de 13 bandas espectrales entre el visible y el infrarrojo medio, con una resolución espacial entre 10 y 60 m. Además, su elevada revisita (10 días, 5 al combinar el Sentinel 2 a y 2b) lo hace muy adecuado para el seguimiento de numerosos fenómenos naturales y antrópicos. La relación de imágenes de satélite utilizadas y sus características principales están recogidas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Imágenes de satélite utilizadas y sus principales características

Satélite sensor	Fecha	Resolución espacial (m)	Resolución espectral. Nº Banda (µm)
Landsat 5	18-08-1984	30	B1 (0,48), B2 (0,56), B3 (0,66), B4 (0,86), B5 (1,65), B6 (11,50) y B7 (2,14)
Landsat 8	16-07-2013	30 15	B1 (0,44), B2 (0,48), B3 (0,56), B4 (0,66), B5 (0,86), B6 (1,65), B7 (2,20) y B9 (1,37) B8 (0,50-0,68)
Spot 5	08-07-2013 16-06-2013	10 20 2,5	B1 (0,55), B2 (0,61) B3 (0,74) B4 (1,67) Pancromática 0.48 - 0.71
Sentinel 2 a	17-02-2016	10 20 60	B2 (0,49), B3 (0,56), B4 (0,66) y B8 (0,84) B5 (0,70), B6 (0,74), B7 (0,78), B8a (0,86), B11 (1,61) y B12 (2,19) B1 (0,44), B9 (0,94) y B10 (1,37)

Fuente: Elaboración propia

A las imágenes de satélite se le aplican diferentes tratamientos visuales y digitales que quedan resumidos en las siguientes fases:

- Mejoras espaciales: mezcla de la imagen Spot pancromática (con resolución de 2,5 m) y la multispectral (10 y 20 m). Con esta mejora se obtiene una imagen que tiene 2,5 m de resolución espacial y su resolución espectral incluye todos los canales visibles (verde 0,50 - 0,59 µm y rojo 0,61 - 0,68 µm) e infrarrojos cercano (0,78 - 0,89 µm) y medio (1,58 - 1,75 µm).

- Mejoras radiométricas: ecualización del histograma para resaltar mejor las distintas parcelas y su uso.
- Mejoras espectrales: combinación de bandas con distinto rango del espectro electromagnético, seleccionando aquellas en las que se obtiene una mejor discriminación de los suelos sellados. También se han efectuado distintos índices mediante operaciones entre bandas. Entre estos índices se han seleccionado el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Construcción de la Diferencia Normalizada (NDBI) porque resaltan mejor los elementos artificiales de los suelos desnudos y/o degradados.

NDVI	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$
NDBI	$(\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{RED})$

El NDVI utiliza la alta respuesta espectral de la vegetación en el canal infrarrojo próximo frente a la baja en el canal rojo, por lo que las áreas con vegetación tienen valores positivos, mientras que los suelos sellados los tienen negativos. El NDBI, por el contrario, tiene los valores positivos en los suelos sellados (Zha *et al.*, 2003).

- Clasificación supervisada de las imágenes Landsat, Spot y Sentinel, en la que se obtiene las clases de suelo sellado, suelo desnudo, erial y vegetación. Se ha seleccionado la clasificación obtenida mediante el algoritmo no paramétrico de la mínima distancia por ser la que más fiabilidad ofrece.
- Evaluación de las clasificaciones mediante la matriz de confusión. Esta se elabora a partir de 50 puntos de control seleccionados de forma aleatoria entre las 4 categorías de la clasificación.
- Corrección de errores mediante la reclasificación de categorías a partir de la comprobación visual con las ortofotografías de fechas coetáneas y trabajo de campo.
- Cálculo de fiabilidad de las clasificaciones con la obtención del estadístico global de Kappa.
- Obtención de la superficie de sellado en las distintas imágenes y fechas.
- Evaluación definitiva de las clasificaciones y comparación de resultados.

Además del estudio con ortofotos e imágenes de satélite se han realizado trabajos de campo, recogiendo muestras de suelos, y se ha analizado el horizonte superficial en laboratorio. Las técnicas empleadas son: textura (método internacional de la Pipeta de Robinson), pH (pasta saturada con agua y KCl), materia orgánica (método de Walkley y Black), carbonatos (calcímetro de Bernard) y conductividad eléctrica (relación suelo/agua 1/1).

4. Resultados y discusión

La pérdida de suelos por sellado se viene evaluando a diferentes escalas desde el inicio de siglo, estimándose resultados muy dispares que oscilan desde el 0,43 % de la superficie del planeta, al 10 % del territorio europeo (AEMA, 2012, C.E, 2014), conforme varían las escalas, fuentes y técnicas empleadas. En todos los casos es destacable el notable incremento reciente, que asciende en Europa a casi el 40 % en las últimas cuatro décadas (Garci *et al.*, 2011 y García *et al.*, 2014).

La utilización de la teledetección y el SIG en la medida del sellado urbano se ha desarrollado fundamentalmente en amplios territorios (Moeller, 2005, Kampourakis *et al.*, 2006;), en los que

se obtienen pérdidas de suelo por impermeabilización muy variables, que oscilan entre el 4,5% en Estados Unidos al 52% en Alemania (Scalenghe y Marsan, 2009).

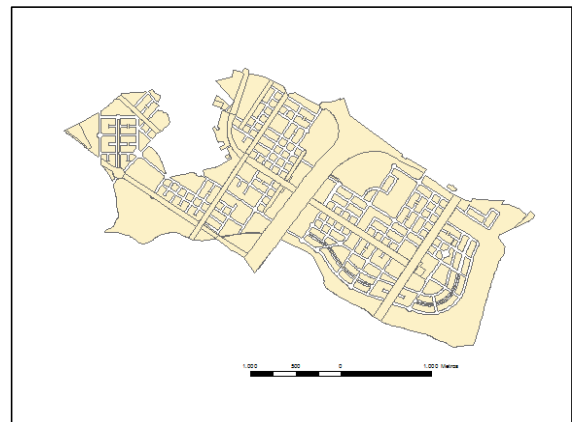
La medida de la pérdida de suelos por sellado se aplica a una unidad territorial concreta para que pueda ser comparable en estudios evolutivos (Valera *et al.*, 2011 a y b). En este trabajo se confrontan las distintas fuentes y técnicas de información geográfica en un espacio de nueva construcción en la ciudad de Madrid, dentro del Programa de Actuación Urbanística (PAU). Para el estudio de caso de dicha unidad concreta se eligió el PAU del Sudeste de Madrid, por ser uno de los de mayor entidad de crecimiento urbano, en unos momentos de estancamiento generalizado del crecimiento superficial urbano.

La expansión urbanística de Madrid en las primeras décadas del siglo XXI se ha favorecido en los espacios desocupados entre los dos viarios de casi circunvalación de la ciudad o almendra central, entre la M30 y M40, continuando los modelos urbanos precedentes de desarrollo vinculado al viario en anillos concéntricos cada vez más alejados del centro y rellenos posteriores. Así, se han construido recientemente numerosos espacios al norte y sudeste de la ciudad de Madrid, si bien con nuevos criterios de diseño y estándares urbanísticos más acordes con las directrices medioambientales europeas, contemplados en los diferentes programas comunitarios en materia de medioambiente y en la Estrategia Territorial Europea. (EEA, 2006; AEMA, 2012; Comisión Europea, 2014).

El Ensanche de Vallecas se inició a finales de los años noventa, pero aún permanece con actividad promotora de viviendas. Los espacios internos, en desarrollo, manzanas sin edificar en el año de la fuente (2014), arrojan unos valores de sellado bajos. Esta bonanza de suelos poco impermeabilizados debe entenderse más como un estar que como un ser, pues obedece a un momento determinado de un proceso de ocupación y construcción urbana no ultimado.

La parcelación de este ensanche urbano se caracteriza por un viario amplio y entramado de grandes parcelas (imagen 1), con una superficie media de 2,81 ha. Si se descuenta las mayores de uso predominante «zonas verdes» y «sin clase» (261,09 ha; 47 parcelas), el tamaño medio decrece considerablemente para el resto de las funciones urbanas, situándose en una media de unas 2 ha.

Imagen 1. Fotografía oblicua del Ensanche de Vallecas, 2008 y plano del mismo.



Fuente: Ayuntamiento de Madrid y www.madrid.org

No tenemos el criterio formado sobre si el tamaño de las parcelas y la fragmentación parcelaria, elementos básicos del diseño del tejido urbano, tiene en sí mismo trascendencia o efectos, sobre el problema de mayor o menor nivel de sellado de suelo. Efectivamente, al existir una amplia variedad de tratamiento urbanístico de cada parcela – en los espacios consolidados –, y posibilidades ilimitadas en las aún vacantes, es especulativo aseverar que una forma urbana de menor fragmentación parcelaria es siempre, más respetuosa con el problema del sellado de suelo. El tratamiento individualizado de cada parcela residencial o industrial puede matizar la adecuación de uno u otro plano urbano a efectos más mitigadores del sellado de suelo, que inevitablemente conlleva el crecimiento de las ciudades.

Con todo, puede señalarse que una mayor fragmentación parcelaria suele conllevar un mayor consumo de suelo por redes viarias locales, pues si las parcelas son más pequeñas, a igualdad de superficie urbana construida, se necesitarán más metros lineales de deslinde y más superficie viaria.

Sin duda, confiar el problema de mitigación del crecimiento urbano, a una cuestión de diseño puede parecer ingenuo, habida cuenta que la «producción de espacio urbano» en nuestro ámbito, es eso, la consecución de un «producto» lucrativo, más especulativo que dotacional – habitacional. Aun siendo consciente de este hecho, y de que diseñar de forma menos compacta incrementa el precio final del producto por la repercusión del precio del suelo, se debe al menos pensar y poner en valor este hecho, por sus beneficios, no tanto de mercado, sino ambientales y de calidad urbana. Esto es, el diseño «ideal sostenible», del que hablara López de Lucio (2007), no sólo hace referencia dentro de la esfera ecológica, centrada en la reducción de emisiones y ahorro energético, si no a la complejidad funcional y otros aspectos imbricados (Zhao *et al.* 2012). En términos muy similares sobre el complejo, huido y polisémico concepto de sostenibilidad urbana se refieren Miret García, (2010), Vaquerizo, (2015), entre otros más antiguos, como García Alvarado (2000), y mucho antes Naredo, Rueda, Prats, y toda la producción al respecto desde la Cumbre de Ciudades, Istanbul, 1996, (Comité Nacional de Habitat II). En este caso se hace referencia a la implicación ecológica de un aspecto no muy tratado en la bibliografía y años citados, como es el sellado de suelo, parámetro de medida de calidad ambiental, de huella ecológica, y, también, de sostenibilidad urbana (Arben *et al.*, 2014), incorporado de forma tardía y, a nuestro juicio aún insuficiente.

En comparación con otros Planes urbanísticos del norte de la ciudad de Madrid coetáneos, y que fueron objeto de una publicación anterior (García Alvarado *et al.* 2018), el ensanche de Vallecas se distingue en su menor valor de suelo ocluido, e igualmente un porcentaje no muy elevado de suelo casi libre (Cuadro 2). En cuanto al último aspecto, está más cerca de los valores de Montecarmelo, que de los de los otros PAUs, aunque con valores muy similares. Puede concluirse que este crecimiento de suelo urbano se muestra con un porcentaje de suelo no sellado entre el 47 – 56 %, siendo, Valdebebas un caso especial ya que alberga en su espacio el Parque Felipe VI y la Ciudad Deportiva del Real Madrid, por lo que es elevado porcentaje de suelo sin sellar. Éste no debe considerarse como la generalidad de este tipo de crecimiento urbano, si bien dota al PAU de una mayor calidad, sostenibilidad ambiental y mejor valoración de este criterio en la huella ecológica. Por otro lado, el valor de 1 % de suelo sellado en nivel 4 (>80%), es el otro extremo que verificaría el poco peso del sellado del suelo en el citado, y excepcional PAU.

Cuadro 2. Sellado de suelos: clases extremas
(cuasi libre o < 20% de sellado y ocluido o > 80 % de sellado).

PAUs Y OTROS DESARROLLOS	% Suelo Cuasi libre	% Suelo Ocluido
MONTERCARMELO	47,8	22,1
LAS TABLAS	53,9	18,8
SANCHINARRO	55,9	18,3
VALDEBEBAS	72,0	9,8
ENSANCHE VALLECAS	48,6	5,8

Fuente: Elaboración propia

El cuadro 3 recoge algunos aspectos del tramado parcelario del ensanche de Vallecas y de los desarrollos urbanísticos coetáneos del norte de la ciudad, a fin de mostrar cómo el crecimiento reciente de Madrid no presenta una homogeneidad ni en la extensión de los proyectos (unos en torno a las 200 ha, y los más extensos, de Valdebebas y Vallecas, que superan las 600 ha), ni en el número y dimensiones de parcelas. Cabe destacar que las parcelas de mayor tamaño de cada PAU tienen asignado un uso de «zonas verdes», con la excepción de Las Tablas, cuyo uso es terciario. Esta excepción es debida a que tiene ubicadas grandes dotaciones del sector empresarial, vinculadas a los ejes A1 y M-40.

Cuadro 3. Parámetros parcelarios en los desarrollos urbanos de Madrid. (*) La fragmentación parcelaria se ha calculado conforme al siguiente índice: $1 - (1/\text{Número de parcelas}) \times 100$

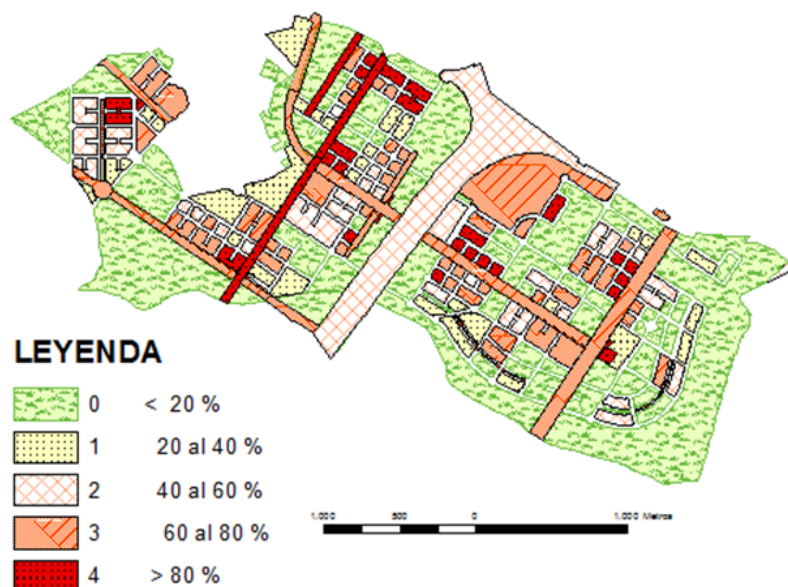
PAU	Sup. ha	Nº Parcelas	Fragmentación parcelaria (*)	Parcel. med. (ha)	Parcela max. (ha)	Uso Parcela max.	Desvst	Coef. var.
Montercarmelo	195,63	101	0,01	1,84	19,36	Zonas verdes	3,2	1,77
Las Tablas	209,57	141	0,29	1,49	16,86	Terciario	2,0	1,35
Sanchinarro	229,87	102	0,02	2,24	24,98	Zonas verdes	2,9	1,29
Valdebebas	983,85	226	0,56	4,35	288,80	Zonas verdes	21,8	5,02
Ensanche Vallecas	610,88	216	0,54	2,81	74,64	Zonas verdes	7,2	0,39

Fuente: Elaboración propia

El análisis visual de la ortofotografía superpuesta al parcelario nos ha permitido descender a la diferenciación de cinco niveles de sellado, tal y como aparece en el mapa 2 y con el resumen estadístico por intervalos expresado en el cuadro 4.

Lo que se evidencia de forma notable es el elevado valor de suelo no sellado (<20 %), pues viene a ser cerca de la mitad de todo el ámbito de estudio (Cuadro 4). Los niveles correspondientes a sellados intermedios (20-60 %) y los más extremos (> de 80 %) presentan valores muy similares (en torno al 8-6 % respectivamente), si bien los espacios con mayor densidad construida (> 60 %, clases 3 y 4 del mapa 2 y cuadro 4) suman cerca del 30 % del suelo impermeabilizado.

Mapa 2. Niveles de sellado en el ensanche de Vallecas.



Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (2014) y Elaboración propia

Cuadro 4. Porcentajes de niveles de sellado en el ensanche de Vallecas en 2016.

CLASE		Superficie. (ha)	%
0	< 20 %	296,8	48,6
1	20 - 40 %	47,8	7,8
2	40 - 60	99,2	16,2
3	60 - 80	131,9	21,6
4	> 80	35,32	5,8
Total		610,88	100,0
Promedio parcela		2,81	
Fragmentación parcelaria		0,54	

Fuente: Elaboración propia

Un último acercamiento a la valoración y comprensión de los diferentes valores de sellado en el Ensanche de Vallecas, ha sido ponerlo en relación con el uso urbano (Cuadro 5). La categorización de usos y la fuente ha sido normativa, pues se ha clasificado cada manzana – con su valor de sellado (de 0 a 4 según % de impermeabilización) – por el uso y por combinaciones de hasta tres usos, un dominante y secundarios, según la extensión de cada uno en una misma manzana. La asignación de uso se ha basado en el mapa de usos que establecen el Plan Parcial UZP 1.03, Ensanche de Vallecas en sus normas reguladoras. En cada tipología se especifica el coeficiente de edificación, que en el caso del uso residencial es bastante generoso con el espacio libre. Este hecho no se traduce en menor sellado, pues el tratamiento del «espacio libre de edificación por manzana» no siempre son superficies libre de sellado, tales como aparcamientos y otros usos anexos que impermeabilizan el suelo. Sí es importante señalar, que a menor coeficiente de edificación, son mayores las posibilidades de emprender acciones posteriores de mitigación, con el remodelado del espacio libre ocluido, mediante ajardinamientos de diferente naturaleza. Por esta razón, pese a

bajos coeficientes de edificabilidad, los usos residencial y terciarios, aparecen como los de mayor porcentaje de suelo en niveles elevados de sellado.

En la clase correspondiente al viario los valores recogidos en el cuadro 5 se corresponden con los elementos más significativos. Algunos adquieren la forma de bulevar y otros son segmentos de la red viaria principal de la ciudad, que disponen de espacios ajardinados de protección, lo que explica que el valor de sellado en este uso no sea muy elevado.

De esta forma, a la base de datos creada por parcelas se le añade el uso urbano a que se destina, real o normativamente. El resultado de este cruce de atributos es el que se especifica en los cuadros siguientes de usos y combinaciones de uso (Cuadro 5).

Cuadro 5. Niveles de sellado por usos de suelo y sus combinaciones. Ensanche de Vallecas.

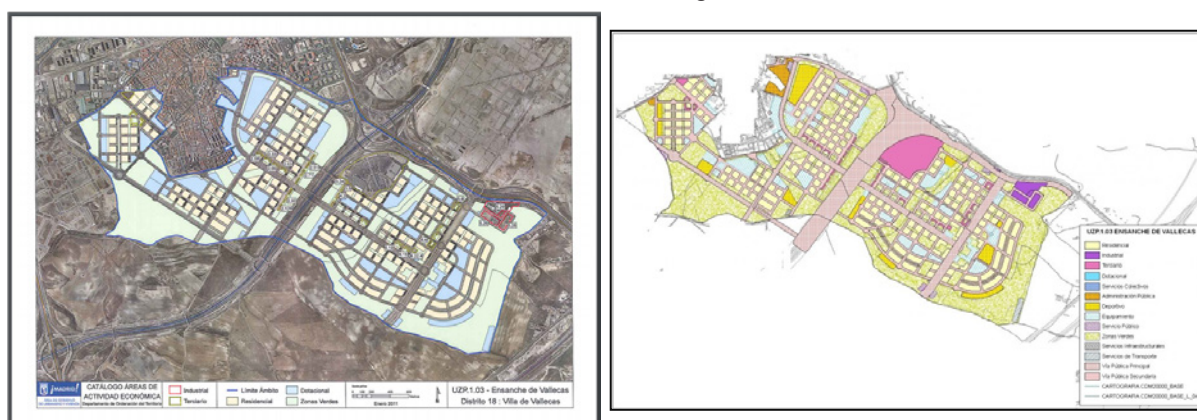
DATOS RELATIVOS						
USOS	Superficie ha. por niveles de sellado %					TOTAL
	<20	20-40	40-60	60-80	>80	
ADMINISTRACIÓN	55,44	44,56	0,00	0,00	0,00	100
DEPORTIVO	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
EQUIPAMIENTOS	41,54	27,19	2,83	21,42	7,01	100
Equipamientos y Zonas verdes	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
EQUIPAMIENTOS TOTAL	56,09	20,43	2,13	16,09	5,27	100
INDUSTRIAL	51,52	48,48	0,00	0,00	0,00	100
Industrial y Residencial	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100
INDUSTRIAL TOTAL	42,96	40,43	0,00	0,00	16,55	100
RESIDENCIAL	13,20	12,17	25,66	34,87	14,10	100
Residencial y Administración	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100
Residencial y Equipamientos	70,04	6,85	0,00	23,11	0,00	100
Residencial y Terciario	54,52	28,50	0,00	0,00	16,98	100
Residencial y Zonas verdes	20,38	9,57	23,13	46,92	0,00	100
RESIDENCIAL TOTAL	19,79	12,05	23,88	33,25	11,03	100
SERVICIO PUBLICO	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	100
TERCIARIO	0,00	2,15	0,00	95,50	2,35	100
Terciario y Residencial	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100
TERCIARIO TOTAL	0,00	2,11	0,00	93,48	4,41	100
Viario Principal	0,03	0,00	50,95	39,57	9,45	100
Viario Secundario	3,13	0,00	0,00	75,07	21,80	100
VIARIO CONTEMPLADO	0,37	0,00	45,26	43,54	10,83	100
ZONAS VERDES	90,38	4,16	2,17	1,86	1,43	100
Zonas Verdes y Equipamientos	77,22	22,78	0,00	0,00	0,00	100
Zonas Verdes Equipamientos y Administración	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
Zonas Verde e Industria	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100
Zonas Verdes y Administración	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
Zonas Verdes y Residencial	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100

DATOS RELATIVOS						
USOS	Superficie ha. por niveles de sellado %					TOTAL
	<20	20-40	40-60	60-80	>80	
Zonas Verdes, Residencial y Equipamientos	0,00	0,00	91,60	0,00	8,40	100
Zonas verdes y Terciario	0,00	50,00	50,00	0,00	0,00	100
ZONAS VERDES TOTAL	86,81	6,09	4,24	1,37	1,49	100
SIN CLASE	88,50	0,00	11,50	0,00	0,00	100
PROMEDIO	48,58	7,82	16,23	21,59	5,78	100

Fuente: Elaboración propia

El cruce de niveles de sellado con los usos de suelo ha sido posible gracias a la información obtenida del catálogo de áreas de actividad económica y del plano de ordenanzas reguladoras (Mapa 3). Habida cuenta que es un catálogo normativo, de cumplirse la normativa y realizarse las previsiones, la realidad sería la reflejada en el cuadro 4.

Mapa 3. Catálogo de áreas de actividades económicas y Plan parcial UZP 1.03 «ensanche de Vallecas», ordenanzas reguladoras.



Fuente: <http://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/Publicaciones/TemaUrbanismo/CatalogoOfertaSueloEnero2008/Ficheros/UZP103n.pdf>.

Una vez cartografiado el PAU y analizada la pérdida de suelo por sellado se han seleccionado imágenes de satélite con el fin de contrastar los resultados anteriores con otras fuentes espaciales de mayor actualización temporal que permitirían agilizar los análisis evolutivos.

Aquí se ha obtenido gran similitud de resultados entre las distintas fuentes y técnicas utilizadas en los espacios ampliamente transformados, con superficies del 60 % o más de impermeabilización.

El amplio desarrollo del programa espacial Landsat, de Estados Unidos, especialmente del sensor L5-TM, nos ha permitido seleccionar una imagen de los años 80 para observar la ocupación del suelo en el lugar donde se ha construido el ensanche de Vallecas. A pesar de la baja resolución espacial de este satélite (30 m) se pudo observar que todo el terreno, posteriormente sellado, estaba en esa década dedicado a parcelas de cultivos en secano o a eriales. La ventaja de las citadas imágenes es su disponibilidad temporal desde los años ochenta hasta la actualidad, lo cual permite hacer un seguimiento evolutivo de todos los cambios a través de casi cuatro décadas (Kam-

pouraki, *et al.* 2006 y Harb, 2012). Su principal inconveniente es su menor resolución espacial y espectral respecto a satélites posteriores.

Mediante la imagen Spot del año 2013 se confirma la desaparición de estos usos con la construcción de infraestructuras, urbanizaciones y áreas deportivas y recreativas. La alta resolución espacial de este satélite (especialmente al mezclar la imagen pancromática con la multiespectral) facilita la delimitación de las parcelas urbanizadas, si bien la presencia de pequeños jardines puede causar interferencia en la identificación del sellado en parcelas muy pequeñas. Para solventar este problema se ha hecho un índice de vegetación con esta imagen. Se ha seleccionado el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI, Mapa 4) por ser el que permite una mejor identificación de las áreas con vegetación. Estas áreas se localizan solo en el parque del suroeste, los campos de fútbol y algunos jardines dentro de las urbanizaciones, si bien algunos sectores ajardinados pueden coexistir con suelos sellados con una mínima superficie libre de impermeabilización. No obstante, aún sobredimensionando un poco la superficie libre de sellado obtenida mediante el NDVI, las funciones medioambientales que ejerce la vegetación en el medioambiente reduce la importancia del pequeño error cometido con dicho índice. Este índice se utilizó previamente en la discriminación visual de áreas no selladas (Pérez y García, 2016), aplicándose en el presente trabajo el mismo criterio pero incluyendo además las medidas obtenidas mediante análisis digital lo que ha permitido realizar una clasificación supervisada (mapas 4 y 5).

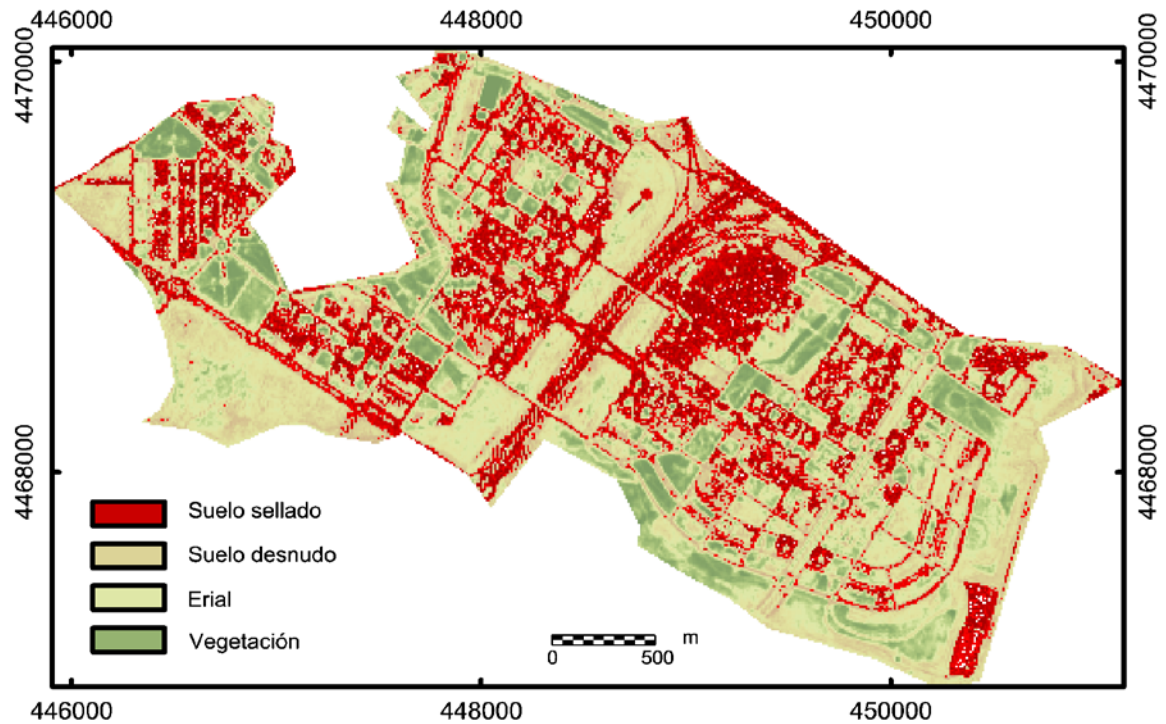
Una vez delimitadas las áreas con vegetación se ha aplicado un índice para tratar de delimitar lo contrario, los suelos urbanizados. En 2003, Zha *et al.* propusieron un índice específico para detectar las superficies construidas, al que denominaron Índice de la Diferencia Normalizada de Construcción (NDBI). Sin embargo, éstos y otros autores ya han señalado que este índice no distingue claramente entre los suelos edificadas y los suelos desnudos o degradados. Por lo tanto, parece adecuado combinarlo con índices de vegetación para reducir los errores producidos con un único índice, (Xu, 2008; Chunyang *et al.* 2010; Varshney, 2013; García y Pérez, 2016).

En la imagen obtenida mediante el NDBI aplicado a la imagen Spot destacan en colores claros (correspondientes a suelos sellados) las obras realizadas en hormigón: aparcamientos, estanque y, en parte, los edificios de viviendas. Sin embargo este índice no permite una buena visualización de toda el área sellada, ya que las sombras de los edificios impiden su correcta identificación.

Por el contrario, en la imagen Sentinel 2A la utilización del NDVI (Mapa 4) ofrece una clara discriminación de las edificaciones (tonos rojizos), de los sectores con vegetación (tonos verdes) y de los suelos desnudos (tonos ocres), por lo que se puede obtener una delimitación de las áreas selladas más fiable. En consecuencia el uso del satélite europeo Sentinel 2 aúna las ventajas de la alta resolución espectral (13 bandas) con una buena resolución espacial (10 metros en algunos canales), por lo que resulta el más idóneo para la medida y seguimiento del sellado del suelo.

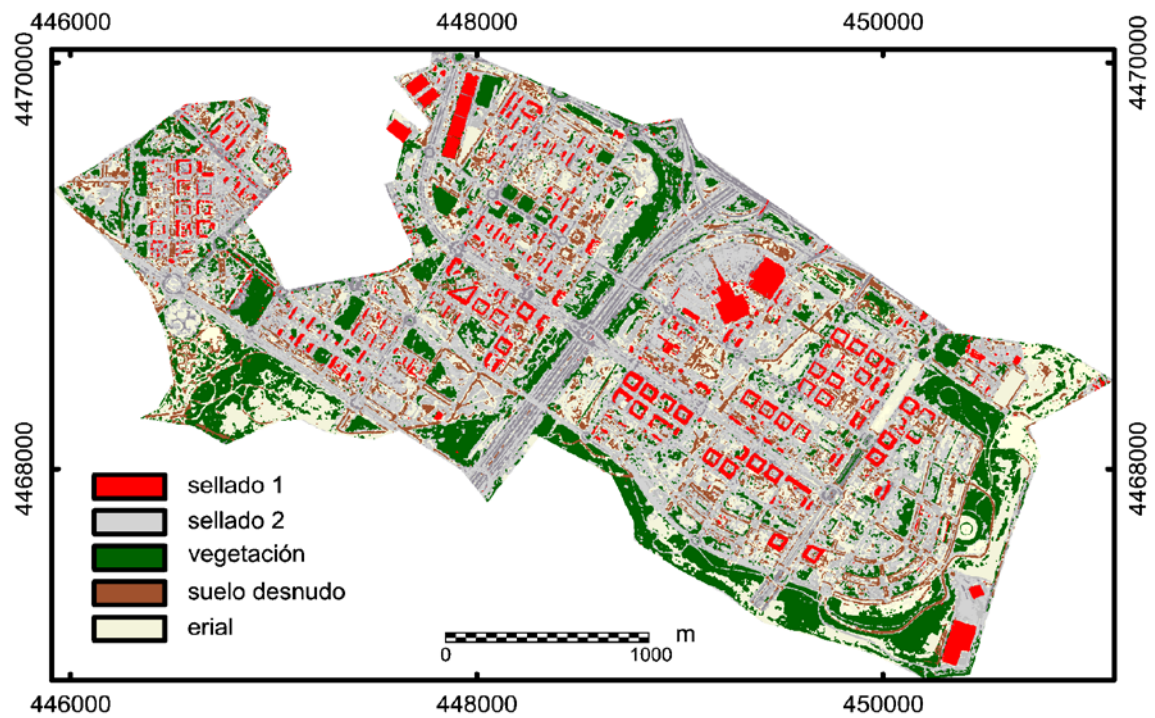
Con el fin de calcular el área sellada y compararla con los datos obtenidos por otras fuentes se ha realizado una clasificación supervisada de las imágenes Spot y Sentinel utilizando el algoritmo de la mínima distancia. Además se evalúa mediante la matriz de confusión la fiabilidad de las clases obtenidas, comparándolo con las ortofotos e imágenes de alta resolución espacial de la misma fecha. En el mapa 5 se muestra la clasificación con mayor precisión espacial y que ofrece mayor fiabilidad.

Mapa 4. Clasificación del sellado de suelo a partir del NDVI de la imagen Sentinel, 2016



Fuente: Elaboración propia a partir de la imagen Sentinel 2 A

Mapa 5. Clasificación supervisada de la imagen Spot, 2013



Fuente: Elaboración propia a partir de la imagen Spot, 2013

Los resultados obtenidos de sellado a partir de las clasificaciones con las imágenes y su fiabilidad se recogen en el cuadro 6:

Cuadro 6. Superficie sellada y libre de sellado obtenida a partir de clasificaciones supervisadas, % de fiabilidad y estadístico globales Kappa.

Imagen utilizada	% suelo sellado	No sellado	% Fiabilidad	Estadístico global Kappa
Spot-5, 2013	23,97	76,03	93,33	0,914
Sentinel 2, 2016	29,29	70,71	66,67	0,510

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias entre ambas estriban, tanto en los tres años que separan ambas imágenes, como en la mayor resolución espacial de la imagen Spot que permite discriminar algunas áreas ajardinadas dentro del parcelario urbano.

Los valores obtenidos en estas clasificaciones en la clase de suelo sellado se corresponden en el Cuadro 4 a los niveles 3 y 4 (mayor del 60% de suelo ocluido, un 27,4%) ya que las imágenes de satélite debido a su menor resolución espacial no discriminan las parcelas en las que el sellado es menor y por lo tanto, arroja una mayor generalización cartográfica. En los valores de menor sellado la fuente visual permite una cierta graduación en el espacio que los sensores remotos genéricamente traducen como no sellado, de manera que se pueden establecer tres intervalos más. Sin embargo, las ventajas del estudio mediante teledetección son muchas. En primer lugar permite de forma bastante rápida la detección de los espacios más afectados y vulnerables, por lo que tiene un gran valor diagnóstico. En segundo lugar la disponibilidad de imágenes de diferentes fechas permite seguir la evolución y tendencias del sellado. En tercer lugar siempre se dispone de datos en tiempo casi real frente a la otra fuente que tiene una disponibilidad temporal más limitada en cuanto a su actualización.

Para evaluar los efectos del sellado de suelos sería conveniente realizar seguimientos anuales, periodicidad que no siempre alcanza las fotografías o parcelarios de detalle, por lo que la incorporación de las imágenes de satélite cubre esta información espacial en casi cualquier territorio. No obstante este seguimiento solo permite saber el porcentaje de suelo sellado y algunas características generales de los mismos. Aun cuando numerosos autores tratan de identificar propiedades de suelos mediante teledetección (Mulders, 1987, Dwivedi, 2017) es necesario realizar trabajo de campo y análisis de laboratorio para identificar su tipología y calidad. Esto es fundamental ya que el sellado suele conllevar la desaparición de los suelos más fértiles con consecuencias negativas en la futura producción agrícola. Por ello se han analizado muestras del horizonte superficial de dos suelos, una situada en el suroeste del ensanche (Vallecas 1, coordenadas 450284,40E – 446700,74N) y la segunda al este (Vallecas 2, coordenadas 447047,87E y 4468490,49N). En Vallecas los suelos son pobres, poco fértiles, con bajo contenido en materia orgánica y alto porcentaje de carbonatos y/o yesos. Las diferencias más notables entre ellos son debidas a la mayor o menor presencia de carbonatos o sulfatos. En la primera muestra la textura del suelo es franco limosa, aunque su determinación es compleja debido a una mala dispersión a causa del alto contenido en carbonatos. El pH es básico. En la segunda muestra, situada en un sedimento más rico en yesos, el contenido en carbonatos es bajo, con una textura franco arcillo arenosa y, sin embargo, el pH es más alto. La conductividad eléctrica, aunque más elevada que en el otro suelo, sigue siendo baja (Cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis de muestras de suelos

Muestra	Grava %	Ar.gr %	Ar.fin %	Limo %	Arcill %	pH H ₂ O	pH KCl	Car %	MO %	C.E	Clasific. (FAO, 07)
Vallecas1	26,50	7,20	19,22	66,45	7,13	7,9	7,1	25,76	0,57	0,22	Luvisol
Vallecas2	22,58	11,30	36,40	23,55	28,75	8,3	7,1	4,37	0,43	1,05	Regosol

Fuente: Elaboración propia

La pérdida de suelos más fértiles se produjo en una etapa anterior a estos desarrollos urbanos, de forma que las infraestructuras viarias ocuparon los suelos de vegas y arroyos (fluvisoles). Con la actual expansión urbana del PAU de Vallecas, se han destruido luvisoles y regosoles, que si bien tiene menor valor agrológico, mantienen el valor ambiental, ya que no deja de ser pérdida de unas formaciones edáficas que cumplen su función ecológica,

5. Conclusiones

Los espacios urbanos más recientes de Madrid, desarrollados en los suelos desocupados entre los dos viarios de casi circunvalación de la ciudad, han incorporado modelos de urbanismo abiertos y con amplias parcelas, en los que las áreas residenciales, empresariales y los diversos usos vinculados incluyen espacios verdes, tanto de uso privativo como general. Esto ha dado lugar, junto al freno inmobiliario de la crisis económica española, a que los valores de sellado de suelos en el Ensanche del sudeste de Madrid apenas asciendan al 30 % del total disponible, cifra sensiblemente inferior a otros Planes urbanísticos del norte de la ciudad coetáneos, que alcanzan entre el 44-53% de pérdida de suelo,

El análisis conjunto del sellado de suelos a partir de las fuentes digitales disponibles, ofrece valoraciones forzosamente dispares. En el caso de las imágenes de satélite de resolución media y alta (10-2,5 m según satélite y sensor) sólo es posible discriminar en este parámetro entre las categorías de sellado y no sellado, aun cuando pueda establecerse algún matiz. Al trabajar con el parcelario urbano y las ortofotos, mucho más precisas espacialmente, pueden establecerse diferentes niveles de sellado (<20, 20-40, 40-60, 60-80 y >80%). Al contrastar los resultados de unas fuentes y otras arrojan resultados muy similares a partir de una impermeabilización del 60 %.

Los cálculos obtenidos a partir de las imágenes de satélite varían también en función del tipo de tratamiento aplicado. Así el NDBI de la imagen Sentinel es muy útil para cartografiar las áreas edificadas, pero los resultados mejoran notablemente si se combinan con el NDVI, ya que se diferencian mejor las áreas selladas frente a las cubiertas por vegetación. Por el contrario la imagen Spot 5 (mezcla de pancromática y multiespectral) resulta más útil para delimitar las parcelas mixtas con edificaciones y jardines debido a su mayor resolución espacial. Las imágenes Landsat son limitadas para medir el sellado por su menor resolución espacial (30 m), pero su elevada disponibilidad temporal permite conocer el uso del suelo en décadas pasadas, donde no existían los recursos actuales.

Con las clasificaciones supervisadas de las distintas imágenes se obtienen de forma semiautomática los valores de suelo sellado. Las diferencias entre los datos obtenidos entre las clasificaciones de las imágenes Spot y Sentinel son debidas a que la mayor resolución espacial del primero considera los jardines situados dentro de las urbanizaciones como suelo no sellado. Por el contrario,

en la imagen Sentinel estas parcelas aparecen como selladas. Además, las sombras de algunas edificaciones no permiten una correcta clasificación inicial, por lo que se requiere reclasificación de errores.

Las superficies de sellado y suelo libre de sellado obtenidas mediante clasificaciones supervisadas son bastante similares, y las pequeñas diferencias entre ambas fuentes responden a la mayor resolución espacial que permite la imagen de mezcla multiespectral y pancromática de Spot-5.

Respecto a las diferencias con la ortofoto la clasificación de ésta es más precisa sin que esté exenta de errores derivados de la interpretación visual del fotointérprete y las dificultades de observación por la presencia de arbolado, sombra de edificios, etc, que impide conocer con el detalle deseable el propio pavimento.

Aunque el uso de ortofotos ofrece mayor precisión para analizar la evolución del sellado en áreas urbanas, su menor resolución temporal no facilita un seguimiento anual; periodicidad que sería deseable para la monitorización de este parámetro ambiental. Por tanto, se hace también necesario el uso de las imágenes de satélite.

Añádase la necesidad de utilizar distintas fuentes cartográficas al realizar un estudio de áreas urbanas ya que las diferentes resoluciones temporales, espaciales y espectrales permiten visualizar distintas características en cada una de ellas. En consecuencia su complementariedad ayuda a corregir las posibles insuficiencias de cada una de ellas.

6. Referencias Bibliográficas

- AEMA (2012). *Guidelines on best practice to limit, mitigate or compensate soil sealing*, Bruselas: Commission Staff Working Document.
- Al-Dousari, Am; Misak, Rafat y Shahid, Shaad (2000). «Soil compaction and sealing in Al-Salmi area, Western Kuwait». *Land Degradation and Development*, 11(5), 401-418.
- Arben Petto, Merko Hasanaj; Matilda; Lushaj, Arvjen; Bogdani-Ndini, Miriam y Arnisa Arvjen (2014). «Implementation of Bioclimatic Principles in the Design of Urban Open Space for Biodiversity Conservation and Sustainable Development of Ecotourism in Lalzi Bay, Durres County, Albania». Online *International Interdisciplinary Research Journal*, IV, 104-121.
- Artmann, Martina (2014). «Assessment of soil sealing management responses, strategies, and targets toward ecologically sustainable urban land use management». *Ambio*, 43(4), 530-541.
- Assouline, Schmuël y Mualem, Yechezkel (2006). «Runoff from heterogeneous small bare catchments during soil surface sealing». *Water Resources Research*, 42 (12), W12405, doi:10.1029/2005WR004592.
- Blum, Winfried E,H (1998). «Soil degradation caused by urbanization and industrial, In H,P, Blume, H, Eger, E, Fleischhaver», A,Hebel, C,Reij y K,G,Steinen (EDS). *Towards Sustainable land use: furthering cooperation between people and institution. Advances in Geoecology Catena Verlag*, 31, 755-766.
- Blum, Winfried E,H, Büsing, Jürgen y Montanarella, Luca (2004). «Research needs in support of the European thematic strategy for soil protection». *Trends in Analytical Chemistry*, 23, 10-11, 680-685.
- Burghardt, Wolfgang (2006). *Soil sealing and soil properties related to sealing*. London: Geological Society, Special Publications.
- Caballero Pedraza, Agustín, (2017). *Sellado de suelos en la comarca del Mar Menor (Murcia), Consecuencias Medioambientales*. Universidad de Murcia, 363 pp.
- Castillo, Victor; Vandekerckhove, Liesbeth y Jarman, Rob (2004). *Working Group on Soil Erosion Introduction*. Final report, European Commission, 23 pp.
- Comisión Europea (2014). *De aquí a 2020: el nuevo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente de la UE*. <http://europa.eu/!Mt88Hh> vía @EU_Commission, Acceso octubre 2016.

- Comité Nacional de Hábitat II (1996). *Ciudades para un futuro sostenible: primer catálogo español de buenas prácticas*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- Chen, Lin; Sela, Shai; Svoray, Tal y Assouline, Schmuel (2013). «The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas». *Water Resources Research*, 49 (9), 5585–5599.
- Chunyang, He; Peijun, Shi; Dingyong, Xie y Yuanyuan, Zhao (2010). «Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach». *Remote Sensing Letters*, 1 (4), 213–221.
- Dwivedi, R, S, (2017). *Remote sensing of soils*, Springer.
- EEA (2006). *Urban sprawl in Europe - the ignored challenge*. Report from the European Environment Agency, October, 2006.
- Escudero, Rosario; Sánchez, Blanca y Moral, Francisco (2010). *El proyecto GMES de sellado de suelo como ejemplo de una forma distribuida y colaborativa de abordar proyectos europeos de teledetección*. Madrid: Congreso Nacional de Medio Ambiente Conama10, Ed, Conama.
- Eilers, Louis (1973). «Soil sealing method». *US Patent* 3,772-893.
- García Alvarado, José María (2000). «El modelo metropolitano madrileño enjuiciamiento desde la perspectiva del V Programa de Acción de la C.E, en materia de Medio Ambiente: Apuntes metodológicos». *Observatorio medioambiental*, 3, 135-158.
- García Alvarado, José María; Pérez González, María Eugenia y García Rodríguez, María Pilar (2014). «Revisión del concepto de sellado de suelos y propuesta de tipología urbana». *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 34, 87-103.
- García Alvarado, J.M.; García Rodríguez, María Pilar y Pérez González, María Eugenia (2018). «Evaluación y medida del sellado de suelos en los Programas de Actuación Urbanística (PAUS) del norte de Madrid (España)». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 1-19.
- García Rodríguez, María Pilar y Pérez González, María Eugenia (2007). «Changes in soil sealing in Guadalajara (Spain): Cartography with LANDSAT images», *Science of the Total Environment*, 378(1-2), 209–213.
- García Rodríguez, María Pilar y Pérez González, María Eugenia (2011). «Sellado de fluviosoles en la Comunidad de Madrid análisis a partir de imágenes Landsat». *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 31, 125-137.
- García Rodríguez, María Pilar y Pérez González, María Eugenia (2014). «Análisis multitemporal del urbanismo expansivo en el Corredor del Henares, Aportación de las imágenes de satélite». *Estudios Geográficos*, LXXV, 277, 597-618.
- García Rodríguez, María Pilar y Pérez González, María Eugenia (2016). «Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain)». *Geoderma*, 268, 100-107.
- García Rodríguez, María Pilar; Pérez González, María Eugenia y Guerra, Antonio, (2014). «Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain)», *Geoderma*, 214-215, 135–140.
- Gardi, Ciro; Montanarella, Luca; Tóth, Gergely; Palmieri, Alexandra; Martino, Leoni y Erhard, Markus (2011). «The Assessment of Soil Sealing and Land Take in Europe», In G, Tóth & T, Németh (Eds.). *Land Quality and Land Use Information in the European Union*. Bruselas: European Comission, Publications Office of the European Union, 173–186.
- Govers, Gerard, y Poesen, Jean (1986). «A field-scale study of surface sealing and compaction on loam and sandy loams soils, Part I, Spatial variability of soil surface sealing and crusting». *Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting*, 171–182.
- Harb Rabia, Ahmed (2012). *Modeling of Soil Sealing by Urban Sprawl in Wukro, Ethiopia Using Remote Sensing and GIS Techniques*. Taza GIS-Days: the International conference of GIS Users, Fez, Morocco.
- Hartemink, Alfred (2006). «Soil Atlas of Europe». *Journal of Environment Quality*, 35(3), 952.
- Heil, Justine; Juo, Anthony y McInnes, Kevin (1997). «Soil properties influencing surface sealing of some sandy soils in the Sahel», *Soil Science*, 162(7), 459-469.
- IGME (1989). *Memoria y mapa de la Hoja 559, 19-22 del Mapa Geológico (Magna); Madrid, escala 1:50,000*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía, 1 ed.
- Jakab, Gergely; Németh, Tamás; Csepinszky, Béla; Madarász, Balazs; Szalai, Zoltan y Kertész, Ádam (2013). «The influence of short term soil sealing and crusting on hydrology and erosion at balaton uplands, Hungary». *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 8(1), 147–155.

- Kampouraki, Mary, Wood, Gavin y Brewer, Tim (2006). *The application of remote sensing to identify and measure sealed areas in urban environments*. Saltzberg: A Proceeding from ISPRS First Int, Conference on Object Based Image Analysis, Saltzberg, Austria.
- Lavallo, Carlo; Demicheli, Luca; Kasanko, Marjo; Turchini, Giovanni M.; Niederhuber, Monika y McCormick Niall (2001). *Murbandy/Moland Technical Report*, Brussels: European Commission Euro-Report.
- López de Lucio, Ramón (2007). Construir ciudad en la periferia, de Ramón López de Lucio, Criterios de Diseño para Áreas Residenciales. Acceso: <http://www.paisajetransversal.org/2013/01/construir-ciudad-en-la-periferia-de.html>, 15 marzo 2016.
- Miret García, Ana (2010). *Criterios para cualificar y valorar los nuevos espacios públicos de la periferia metropolitana desde la perspectiva de la diversidad a través del estudio de caso de los Paus de Madrid*. Congreso Ciudad Territorio y Paisaje, Mayo 2010.
- Montanarella Luca (2007). «Trends in land degradation in Europe». In: Sivakumar MVK, Ndegwa N, (edit). *Climate and land degradation*. Germany, Springer-Heidelberg, pp, 83-104.
- Monturiol, Francisco y Alcalá, Luis, (1990a). *Mapa de asociaciones de suelos de la Comunidad de Madrid, Escala 1:200,000*, Madrid: C,S,I,C. Comunidad de Madrid, 71 pp.
- Monturiol, Francisco y Alcalá, Luis, (1990b). *Mapa de Capacidad Potencial de Uso Agrícola de la Comunidad de Madrid, Escala 1:200,000*. Madrid,C,S,I,C, Comunidad de Madrid, 31 pp.
- Moeller, Matthias (2005). *Remote Sensing for the monitoring of urban growth patterns*. Tempe: Proc. of the ISPRS Joint Conference URBAN/URS, Tempe, AZ, USA, 2005.
- Moreira, José Manuel (2012). «Urbanismo expansivo: de la utopía a la realidad, Reflexiones desde la información ambiental». En: Gozávez Pérez, V, & Marco Molina, J,A, (Coord.). *Geografía: Retos ambientales y territoriales*, 125-164.
- Muallem, Yechezkel; Assouline, Schmuël y Rohdenburg, Heinrich (1990). «Rainfall induced soil seal (A) A critical review of observations and models». *Catena* 17, 185-203,
- Mulders, M, A, (1987). *Remote Sensing in Soil Science*. Elsevier, Amsterdam.
- Munafo, Michele; Norero, Carlo; Sabbi, Alberto y Salvati, Luca (2010). «Soil Sealing in the Growing City: A Survey in Rome, Italy». *Scottish Geographical Journal*, 126(3), 153–161.
- Munafo, Michele; Salvati, Luca y Zitti, Marco (2013). «Estimating soil sealing rate at national level - Italy as a case study». *Ecological Indicators*, 26, 137–140.
- Mukesh,Singh Boor; Maik, Netzband; Komal, Choudhary y Vít, Voženílek (2015). «Monitoring and modeling of urban sprawl through remote sensing and GIS in Kuala Lumpur, Malaysia». *Ecological Processes*, 4:15, DOI: 10.1186/s13717-015-0040-2.
- Netzband, Maik y Meinel, Gothard (1998). «Identifying urban soil sealing by high resolution remote sensing methods». In J, Breuste, H, Feldmand, & O, Uhlman (Eds.), *Urban Ecology*, Springer-Verlag.
- Ojeda, José y Villar, Arsenio (2006). «Evolución del suelo urbano/alterado en el litoral de Andalucía (España): 1998-2002». *Geofocus*, 7, 73-99.
- Pérez González, María Eugenia y García Rodríguez, María Pilar (2013). «Aplicaciones de la Teledetección en degradación de suelos». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61, 285-308.
- Pérez González, María Eugenia y García Rodríguez, María Pilar (2016). «Monitoring Soil Sealing in Guadarrama River Basin, Spain, and Its Potential Impact in Agricultural Areas». *Agriculture*, 6(1), 7.
- Pérez González, María Eugenia y García Rodríguez, María Pilar (2017). «Monitoring soil erosion by raster images: from aerial photographs to drone taken pictures». *European Journal of Geography*, 7(5), 117- 129.
- Poesen, Jean, y Govers, Gerard (1986). A field-scale study of surface sealing and compaction on loam and sandy loam soils. Part II, Impact of soil surface sealing and compaction on water erosion processes. *Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting*, 183–193.
- Prokop, Gundula; Jobstmann, Heidi y Schönbauer, Arnulf (2011). *Overview of best practices for limiting soil sealing or mitigating its effects in EU-27*. Brussels: European Communities.
- Pulido Moncada, Mansonia; Gabriels, Donalds; Lobo, Deyanira; De Beuf, Kristof; Figueroa, Rosana y Cornelis, Win (2014). «A comparison of methods to assess susceptibility to soil sealing». *Geoderma*, 226-227(1), 397–404.
- Ramos, María Concepción, Nacci, Silvana, y Pla, Ildefonso (2000). «Soil sealing and its influence on erosion rates for some soils in the Mediterranean area». *Soil Science*, Vol, 165 (5), 398-403.

- Romero Díaz, Asunción; Belmonte Serrato, Francisco; Docampo Calvo, Ana María y Ruiz Sinoga, José Damián (2011). «Consecuencias del sellado de los suelos en el Campo de Cartagena (Murcia)». In Gozávez Pérez, V, & Marco Molina, J.A, (Coords.): *Geografía y desafíos territoriales en el siglo XXI*, Vol, 2, 605-616.
- Römken, Mathias, Prasad, Shyam, y Gerits, Johannes Jacobus Petronela (1997). «Soil erosion modes of sealing soils: A phenomenological study». *Soil Technology*, 11(1), 31-41.
- Scalenghe, Riccardo y Marsan, Franco Ajmone (2009). «The anthropogenic sealing of soils in urban areas». *Landscape and Urban Planning*, 90, 1-10.
- Singer, Michael y Le Bissonnais, Yves (1998). «Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a Mediterranean climate». *Geomorphology*, 24(1), 79-85.
- Tomás, Alberto; Salas, Francisco Javier; Santos, Cesar; Garzón, Antonio y Moreno, Victoriano (2010). «Estimación del sellado del suelo mediante técnicas de análisis espectral». *Serie Geográfica*, 16, 81-92.
- Ungaro, Fabrizio; Calzolari, Costanza; Pistocchi, Alberto y Malucelli, Francesco (2014). «Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydropedological approach». *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62 (1), 33-42.
- Valentín, Christian (1994). «Sealing, crusting and hardsetting soils in sahelian agriculture», In H, B, So, G, D, Smith, S, R, Raine, B, M, Schafer, & R, J, Loch (Eds.). *Second International Symposium on Sealing, Crusting and Hardsetting Soils: Productivity and Conservation*. Australian Society of Soil Science Inc, 53-76.
- Valera, Antonio; Añó, Carlos y Sánchez, Juan (2011a). «Crecimiento urbano (1956-2005) y sellado antropogénico del suelo en el municipio de Alacant». *Serie Geográfica*, 17, 97- 108.
- Valera, Antonio; Añó, Carlos y Sánchez, Juan (2011b). «Cincuenta años (1956-2006) de crecimiento urbano y degradación de suelos por sellado antropogénico en el término municipal de Valencia». *Anales de Geografía*, 31 (2), 177-191.
- Vaquerizo Gómez, Elena (2015) «La arquitectura de la «nueva periferia»: dinámicas socioculturales urbanas en el PAU de Vallecas». *Dialectología y Tradiciones Populares*, Vol, LXX, 2, 503-526.
- Varshney, Avnish (2013). «Improved NDBI differencing algorithm for built-up regions change detection from remote-sensing data: an automated approach». *Remote Sensing Letters*, 4(5), 504-512.
- WBRS (2014). *Base Referencia Mundial del Recurso Suelo, Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*, No, 106. FAO, Roma.
- Xiao, Rui; Su, Shiliang; Zhang, Zhonghao; Qi, Jianguo; Jiang, Diwei y Wu, Jiaping (2013). «Dynamics of soil sealing and soil landscape patterns under rapid urbanization». *Catena*, 109, 1-12.
- Xu, Hanqiu (2008). «A new index for delineating built-up land features in satellite imagery». *International Journal of Remote Sensing*, 29 (14), 4269-4276.
- Zha, Yong; Gao, Jingqing y Ni, Shaoxiang (2003). «Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery». *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594, DOI: 10.1080/014311603004987.
- Zhao, Dan; Li, Feng; Wang, Rusong; Yang, Qingrui y Ni, Hongshan (2012). «Effect of soil sealing on the microbial biomass, N transformation and related enzyme activities at various depths of soils in urban area of Beijing, China». *Journal of Soils and Sediments*, 12(4), 519-530.